



TUGAS AKHIR - TL 141584

**ANALISA KERUSAKAN SUPERHEATER TUBE
BOILER TIPE ASTM A213 GRADE T11 PADA
PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA UAP**

**JEREMY ADRIAN
NRP 2712 100 127**

**Dosen Pembimbing
Dr. Lukman Noerochim, ST., M.Sc.Eng
Budi Agung Kurniawan, S.T.,M.Sc**

**JURUSAN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2016**

(Halaman ini sengaja dikosongkan)



FINAL PROJECT - TL 141584

FAILURE ANALYSIS OF SUPERHEATER TUBE BOILER ASTM A213 GRADE T11 TYPE AT STEAM POWER GENERATOR

**JEREMY ADRIAN
NRP 2712 100 127**

Advisor

**Dr. Lukman Noerochim, ST., M.Sc.Eng
Budi Agung Kurniawan, S.T.,M.Sc**

**DEPARTMENT OF MATERIALS AND METALLURGICAL ENGINEERING
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya
2016**

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

**ANALISA KERUSAKAN SUPERHEATER TUBE
BOILER TIPE ASTM A213 GRADE T11 PADA
PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA UAP**

TUGAS AKHIR

**Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik (S.T.)
Pada**

**Bidang Studi Korosi dan Analisa Kegagalan Material
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Material dan Metalurgi
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

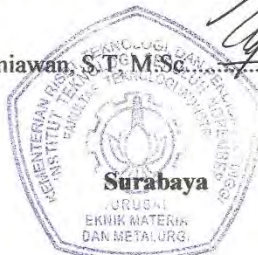
Oleh :

**JEREMY ADRIAN
NRP. 2712 100 127**

Disetujui oleh Dosen Pembimbing Tugas Akhir

1. Dr. Lukman Noerochim, S.T, M.Sc.Eng.....(Pembimbing 1)

2. Budi Agung Kurniawan, S.T, M.Sc.....(Pembimbing 2)



Juni 2016

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

**ANALISA KERUSAKAN SUPERHEATER TUBE BOILER
TIPE ASTM A213 GRADE T11 PADA PEMBANGKIT
LISTRIK TENAGA UAP**

Nama : Jeremy Adrian
NRP : 2712100127
Jurusan : Teknik Material dan Metalurgi
Dosen Pembimbing : Dr. Lukman Noerochim, ST, M.Sc. Eng
Budi Agung Kurniawan, ST, M.Sc

ABSTRAK

Boiler memiliki peranan penting di dalam pembangkit listrik tenaga uap di Indonesia. Pada pipa boiler sering terjadi kegagalan terutama pada pipa *superheater*. *Superheater* ini merupakan komponen dimana uap air dipanaskan sampai temperatur tinggi sehingga memiliki tekanan yang cukup untuk menggerakkan generator pada PLTU. *Superheater* mengalami kerusakan berupa pecah ke luar (*burst*) dikarenakan penipisan pipa. Kegagalan ini terjadi setelah pemakaian selama 12,8 tahun. Dari hasil pengujian komposisi diketahui bahwa pipa *superheater* ini merupakan *alloy Steel* dengan tipe ASTM A213 grade T11. Hasil metalografi menunjukkan struktur mikro pada material ini adalah ferit dengan ukuran butir pada daerah yang rusak lebih besar daripada daerah yang masih baik. Pada hasil metalografi juga ditunjukkan dengan adanya *void* dan *crack* yang muncul pada batas butir. Pada pengujian *hardness* diketahui bahwa daerah yang tidak rusak memiliki kekerasan 52 HRB dan pada daerah yang mengalami kerusakan memiliki hasil uji kekerasan sebesar 25,5 HRB. Dari data SEM diketahui berkas patahan yang terjadi merupakan patah ulet dan terdapat intergranular crack pada permukaan. Dapat disimpulkan bahwa kegagalan terjadi karena adanya *Thermal Fatigue* yang kemudian menyebabkan adanya *creep*.

Kata kunci : *Superheater*, *shutdown*, kerusakan, Alloy Steel, *burst*.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

**FAILURE ANALYSIS OF SUPERHEATER TUBE BOILER
ASTM A213 GRADE T11 TYPE AT STEAM POWER
GENERATOR**

Name : **Jeremy Adrian**
SRN : **2712100127**
Major : **Material & Metallurgical Engineering**
Advisor : **Dr.Lukman Noerochim, ST, M.Sc.Eng**
Budi Agung Kurniawan , ST, M.Sc

ABSTRACT

The boiler has an important role in a steam power plant in indonesia. On boiler, pipe failure often occurs mainly on superheater pipe. This is where the Superheater steam water heated to high temperatures so that it has enough pressure to drive the generator on Steam Power Generator. Damage in the form of Superheater broke out due to thinning (burst) pipe. This failure occurs after 12,8 years of usage. From the results of testing the composition of superheater pipe note that this is an alloy Steel with type ASTM A213 grade T11. The results of metallography showed the microstructure in materials is ferrite and grain size in the damaged area is larger than the area that is still good. On the results of metalografi also indicated the presence of voids and crack that appears on grain boundaries. On hardness testing it is known that the area which is still good has an average hardness 52 HRB and in areas that suffered damage the test result on average hardness is 25.5 HRB. From the SEM examination known that the faulting profile is resilient and intergranular crack shown on the surface. It can be concluded that failure occurs as the presence of Thermal Fatigue which is led to creep that was the main issue of the failure.

Keywords : Superheater, shutdown, failure, Alloy Steel, burst.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	vii
ABSTRAK.....	ix
ABSTRACT	xi
DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTAR GAMBAR.....	xv
DAFTAR TABEL.....	xvii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan Penelitian	2
1.5 Manfaat Penelitian	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Boiler	5
2.1.1 <i>Fire-Tube Boilers</i>	5
2.1.2 <i>Water-Tube Boilers</i>	6
2.2 <i>Superheater</i>	8
2.2.1 <i>Superheater</i> Radiasi.....	9
2.2.2 <i>Superheater</i> Konveksi	9
2.3 Kondisi Pengoperasian Boiler.....	10
2.4 Korosi Pada Boiler.....	10
2.4.1 Korosi Oksigen.....	11
2.4.2 <i>Caustic Corrosion</i>	12
2.4.3 <i>Caustic Embrittlement</i>	13
2.4.4 <i>Hidrogen Damage</i>	14
2.4.5 <i>Stress Corrosion Cracking</i>	15
2.4.6 <i>Corrosion Fatigue</i>	16
2.4.7 <i>Acid Attack</i>	17
2.4.8 <i>Chelant Corrosion</i>	17
2.4.9 <i>Coal-Ash Corrosion</i>	18
2.5 Baja.....	18
2.6 Pengaruh Unsur Paduan.....	21
2.7 Analisa Kegagalan	23

2.8	Efek Lingkungan.....	23
2.9	<i>Creep</i>	25
2.10	Prosedur Perhitungan Batas Butir Plainmetric.....	26
2.11	Pengaruh Grain Terhadap Sifat Mekanik Baja	27
2.12	Penelitian Sebelumnya.....	27
BAB III METODOLOGI PERCOBAAN.....		31
3.1	Diagram Alir Penelitian	31
3.2	Bahan Penelitian	32
3.3	Alat Penelitian.....	33
3.4	Tahap Penelitian	33
3.4.1	Studi Literatur dan Preparasi Spesimen.....	33
3.4.2	Pengamatan Secara Makroskopis	33
3.4.3	Pengujian Komposisi Kimia	34
3.4.4	Pengujian Metalografi	35
3.4.5	Pengujian Hardness	37
3.4.6	Pengujian SEM	38
3.5	Rancangan Eksperimen	39
BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN.....		41
4.1	Hasil Analisa Pengujian	41
4.1.1	Hasil Pengujian Komposisi Kimia.....	42
4.1.2	Hasil Pengujian Metalografi	43
4.1.2.1	Hasil Metalografi Bagian1.....	44
4.1.2.2	Hasil Metalografi Bagian 2.....	45
4.1.2.3	Hasil Metalografi Bagian 3	46
4.1.3	Hasil Penghitungan Batas Butir.....	47
4.1.4	Hasil Pengujian Kekerasan.....	47
4.1.5	Hasil Pengujian SEM.....	48
4.2	Pembahasan.....	50
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		55
5.1	Kesimpulan	55
5.2	Saran.....	55
DAFTAR PUSTAKA		57
LAMPIRAN		
BIODATA PENULIS		

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Kondisi Operasi dari PLTU	10
Tabel 2.4 Tabel Penelitian Yang Telah Dilakukan	27
Tabel 3.1 Spesifikasi Komposisi Kimia ASTM A213 Grade T11	32
Tabel 3.2 Spesifikasi Sifat Mekanik ASTM A213 Grade T11 ..	32
Tabel 3.3 Rancangan eksperimen yang dilakukan	39
Tabel 4.1 Hasil Uji Spektrometer	41
Tabel 4.2 Data Hasil Perhitungan Ukuran Diameter Butir	47
Tabel 4.3 Rata-rata Hasil Uji Kekerasan	48

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	<i>Scotch Package Firetube Boiler</i>	6
Gambar 2.2	<i>Water Tube Boiler</i>	7
Gambar 2.3	<i>FBC Water-Tube Boiler</i>	7
Gambar 2.4	Panel <i>superheater</i> saat produksi	8
Gambar 2.5	Beragam Susunan Superheater.....	9
Gambar 2.6	Caustic Embrittlement (500x).....	13
Gambar 2.7	<i>Intergranular Oxidation</i>	15
Gambar 2.8	<i>Corrosion Fatigue Crack</i>	16
Gambar 2.9	Acid Attack	17
Gambar 2.10	Diagram Fasa Besi-Besi Karbida	19
Gambar 2.11	Struktur Mikro Pada Baja	20
Gambar 2.12	Berkas Patah Cepat	25
Gambar 2.13	<i>Creep</i>	26
Gambar 3.1	Diagram Alir Penelitian	31
Gambar 3.2	Tube Superheater yang Mengalami Kerusakan ...	34
Gambar 3.3	Mesin Uji Spektroskopi	35
Gambar 3.4	Mikroskop Optik.....	36
Gambar 3.5	Ilustrasi Mesin Uji Hardness.....	37
Gambar 3.6	Spesimen uji SEM.....	38
Gambar 3.7	Mesin SEM	38
Gambar 4.1	Bagian Spesimen yang dilakukan pengujian metalografi	42
Gambar 4.2	Distribusi Temperatur pada Bagian 1,2, dan 3....	43
Gambar 4.3	Struktur mikro bagian 1 dengan perbesaran 500x	43
Gambar 4.4	Struktur Mikro bagian 2 dengan perbesaran 500x	44
Gambar 4.5	Struktur Mikro bagian 2 dengan perbesaran 500x	45
Gambar 4.6	Struktur mikro bagian 3 dengan perbesaran 500x	46
Gambar 4.7	Struktur mikro bagian 3 dengan perbesaran 500x	46
Gambar 4.8	Daerah yang di lakukan uji SEM	48
Gambar 4.9	Hasil Pengujian SEM pada bagian luar.....	49
Gambar 4.10	Hasil pengujian SEM pada tepi bagian dalam ...	49

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pembangkit listrik tenaga uap merupakan salah satu jenis pembangkit listrik yang paling sering digunakan di Indonesia. Pada pembangkit listrik tenaga uap atau PLTU, boiler memegang peranan penting sebagai penghasil uap. Pada pembangkit listrik tenaga uap, batu bara digunakan untuk menaikkan temperatur dari tabung-tabung dengan temperatur 530-1000 °C. Paparan temperatur tinggi pada luar tabung, tekanan tinggi yang ada di dalam, dan juga api yang telah terkontaminasi dengan residu yang bersifat korosif dalam jumlah waktu yang lama akan menyebabkan kegagalan pada pipa.

Coal-fired boiler atau boiler berbahan baku batu bara memegang peranan penting dalam industri pembangkit listrik di seluruh dunia, dengan menyuplai uap bertekanan tinggi untuk memutar generator. Tabung *superheater* biasanya terletak pada zona terpanas dari boiler ataupun *Steam Generator*. Uap yang memiliki temperatur tinggi dan tekanan tinggi dimasukkan kedalam tabung *superheater* yang akan terkena temperatur yang sangat tinggi dari pembakaran batu bara. Karena itu, tabung *superheater* rentan akan kegagalan korosi dan patah pada temperature tinggi. Walaupun material dari superheater memiliki sifat yang lebih baik daripada material lainnya pada boiler, tetapi kegagalan pada tabung superheater sering terjadi. Untuk mencegah terjadinya kegagalan, yang berlanjut pada *shut down* suatu proses, harus dilakukan beberapa *assessment* untuk menghindari terjadinya proses shutdown.

Kegagalan pada pipa boiler ini dapat berdampak besar dalam proses ataupun didalam kerugian yang ditimbulkan. Ketika terjadi kegagalan harus dicari dengan benar apakah akar permasalahan yang tepat untuk menghilangkan ataupun mengurangi kegagalan yang dimungkinkan terjadi di masa depan. Maka dari itu dilakukan sebuah analisa yang dapat mengetahui penyebab dari kegagalan



yang ditimbulkan. Beberapa jenis kegagalan yang dapat terjadi antara lain: *caustic attack, hydrogen damage, oxygen pitting, acid attack, stress corrosion cracking, water corrosion fatigue, superheater fireside ash corrosion, fireside corrosion fatigue, short-term overhear, long-term overhear, dissimilar metal weld (DMV) failure, erosion, dan mechanical fatigue*.

1.2 Perumusan Masalah

Permasalahan yang akan di bahas di dalam analisa kegagalan pada *superheater* boiler adalah sebagai berikut:

1. Faktor apa saja yang menyebabkan kegagalan pada *superheater* boiler?
2. Bagaimana mekanisme kegagalan yang terjadi pada *superheater* boiler?

1.3 Batasan Masalah

Agar penelitian ini menjadi terarah dan memberikan kejelasan dalam analisis permasalahan yang akan dilakukan, maka diberikan pembatasan permasalahan sebagai berikut :

1. Kondisi material awal sama di setiap bagian. Dianggap tidak ada cacat pada spesimen sebelum gagal.
2. Kondisi lain seperti daya, tekanan, frekuensi dan voltase dianggap sebagai sebuah sistem konstan yang sesuai dengan standar operasional yang dilakukan.
3. Data speismen yang di dapatkan adalah dalam keadaan normal sesuai standar operasional.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari analisa kegagalan pada *superheater* boiler adalah:

1. Menganalisa penyebab terjadinya analisa kegagalan pada *superheater boiler*.
2. Menganalisa mekanisme terjadinya kegagalan pada *superheater boiler*.



1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan rekomendasi dari kegagalan *superheater boiler* dan menjadi acuan pencegahan terjadinya kegagalan serupa di kemudian hari.



Laporan Tugas Akhir
Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Boiler

Boiler adalah sebuah bejana bertegangan yang di desain untuk memanaskan air atau memproduksi uap panas, yang dapat digunakan untuk pembangkit listrik dan sebagainya. Boiler menggunakan energi dari bahan bakar fosil maupun non-fosil, tetapi bahan bakar yang paling sering digunakan adalah batu bara, minyak bumi, dan gas alam. Ketika proses pembakaran, oksigen bereaksi dengan karbon, hidrogen, dan elemen elemen dari bahan bakar tersebut untuk menghasilkan gas pembakaran dan menghasilkan panas.

Boiler diproduksi dalam berbagai ukuran dan desain tergantung oada karakteristik dari bahan bakar, temperatur output, dan kontrol emisi yang diperlukan. Beberapa boiler hanya dapat menghasilkan air panas (seperti pada *water heater* rumahan), sementara yang lainnya dirancang untuk menghasilkan uap panas untuk menjalankan generator.

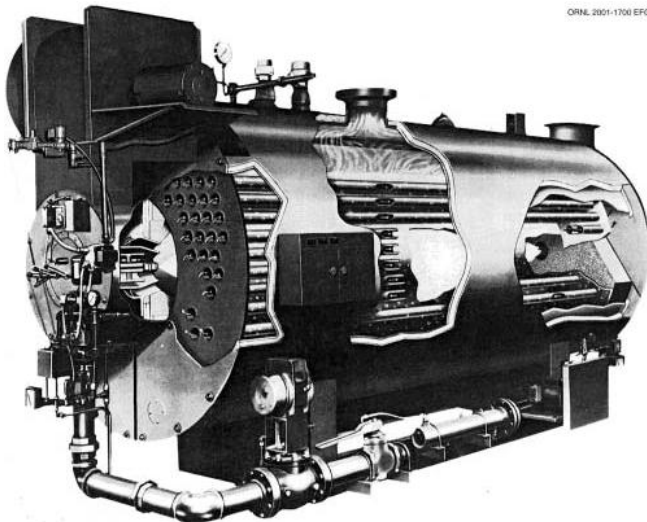
Boiler biasanya dibangun sesuai dengan persyaratan yang di adopsi dari *American Society of Mechanical Engineers (ASME)*, tepatnya pada *ASME Boiler and Pressure Vessel Code*. Boiler dapat di klasifikasikan menurut posisi dari air dan gas pembakaran menjadi *fire-tube boilers* dan *water tube boilers*.

2.1.1 Fire-Tube Boilers

Fire-tube boiler terdiri dari serangkaian tabung lurus yang ditempatkan di dalam tabung yang berisi air. Tabung diatur sedemikian rupa segingga gas panas mengalir melalui tabung. Ketika gas mengalir melalui tabung, uap-uap itu memanaskan tabung, dan tabung yang bersentuhan dengan air tersebut akan memanaskan air yang mengelilinginya. Air tadi dibatasi oleh lapisan terluar dari boiler. Untuk menghindari kebutuhan dari lapisan luar yang tebal, maka *fire-tube boiler* ini hanya dignakan untuk aplikasi untuk yang bertekanan rendah. Umumnya, kapasitas dari panas



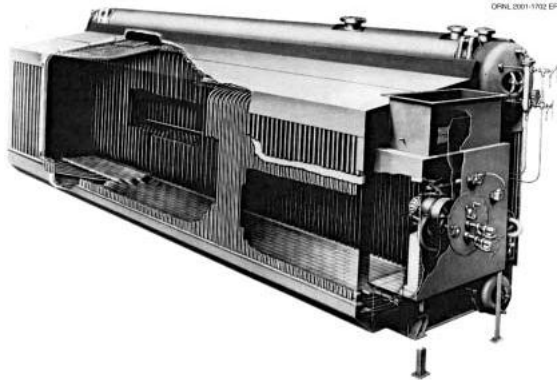
input dari firetube boiler ini dibatasi hanya untuk sampai 50 MBtu/h. *Fire-tube boiler ini* diilustrasikan ke dalam Gambar 2.1.



Gambar 2.1 *Scotch Package Firetube Boiler*
(sumber: Elie Tawil.2001)

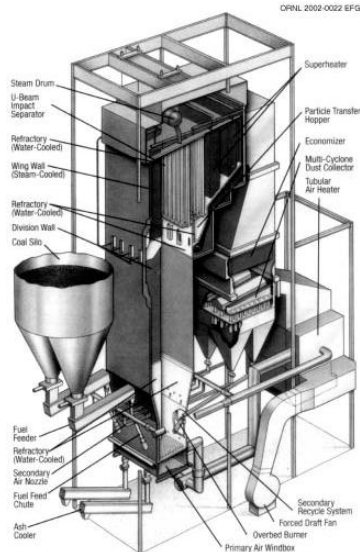
2.1.2 *Water-Tube Boilers*

Water-tube boilers dirancang untuk mensirkulasikan gas panas hasil pembakaran di sekitar tabung yang berisi air. Tabung itu disambungkan antara bagian atas dan bagian bawah yang disebut *steam drum* dan salah satunya yang bertempat lebih rendah dari *drum*. Boiler jenis ini dibuat dalam ukuran yang jauh lebih besar dan juga dapat mengenerasikan tekanan tinggi. Desain dari boiler ini dapat beragam tergantung dari jenis bahan bakar yang digunakan. Jenis yang paling sering digunakan adalah pemakaian batu bara sebagai bahan bakar. Contoh *water-tube boiler* dapat dilihat pada Gambar 2.2, dan sistem *water tube boiler* dapat dilihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2.2 *Water Tube Boiler*

(sumber: American Boiler Manufacturers Association, 1997)



Gambar 2.3 *FBC Water-Tube Boiler*

(sumber: *Our Boilers and Environmental Equipment*, 1998)



2.2 Superheater

Superheater adalah suatu *heat exchanger* yang memanaskan uap jenuh sampai *overheat*. Dengan memanaskan uap jenuh menggunakan *superheater* suhu uap akan meningkat drastis dan menyebabkan efisiensi dari produksi energi dapat ditingkatkan. Manfaat dari penggunaan uap yang dipanaskan dengan sangat tinggi adalah sudah tidak terdapat kadar air di dalamnya, selain itu tidak ada kondensat dalam pipa uap, selain itu efisiensi produksi energi lebih tinggi.

Superheater biasanya terbentuk dari tabung yang menghantarkan uap, yang dipanaskan oleh gas hasil pembakaran yang melewati sisi luar tabung. Pada suatu unit boiler dapat terdiri dari beberapa *superheater*. *Superheater tubes* diilustrasikan ke dalam Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Panel *superheater* saat produksi
(sumber: Sebastian Tier.2002)

Superheater dapat dibagi menjadi 2 jenis yaitu *superheater* radiasi dan *superheater* konveksi.

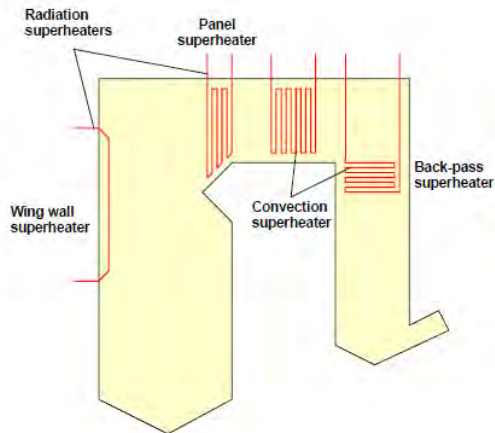


2.2.1 **Superheater Radiasi**

Superheater radiasi digunakan untuk mendapatkan suhu uap yang lebih tinggi dan panas dan panasnya disalurkan melalui radiasi. Superheater ini ditempatkan di dalam jangkauan radiasi dari api. Jadi biasanya superheater ini terdapat pada dinding atas boiler, di atas tungku dimana sarana utama perpindahan panas dari radiasi.

2.2.2 **Superheater Konveksi**

Superheater konveksi adalah superheater yang paling sering digunakan pada boiler uap. Superheater konveksi digunakan dengan uap bersuhu rendah dan panas dari gas buang utamanya dihantarkan dengan cara konveksi. Superheater jenis ini dapat juga terproteksi dari radiasi oleh tabung evaporator. Superheater konveksi dapat menggantung di atap boiler atau mereka dapat di tempatkan di kedua sisi boiler.



Gambar 2.5 Beragam Susunan Superheater
(Sumber: Sebastian Tier.2002)



2.3 Kondisi Pengoperasian Boiler

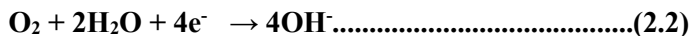
Boiler dioperasikan dalam sistem bertemperatur tinggi yang tertutup dengan kondisi operasi ditunjukkan pada Tabel 2.1

Tabel 2.1 Kondisi Operasi dari PLTU

Laju Aliran (t/h)	2,120
Tekanan Aliran (MPa)	450
Temperatur Aliran (°C)	540
Temperatur <i>Feed Water</i> (°C)	277
Fluida	<i>Boiler Water, saturated steam</i>
Bahan Bakar	Batu Bara
Pemicu Bakar	<i>Light Oil</i>

2.4 Korosi Pada Boiler

Korosi merupakan suatu kondisi dimana terjadinya kerusakan, penurunan mutu material (logam) akibat terjadinya reaksi dengan lingkungannya. Secara umum korosi terjadi karena terjadinya kontak antara atom Fe dengan air ataupun uap air sehingga teroksidasi membentuk kation Fe^{2+} . Selanjutnya ion Fe^{2+} bereaksi dengan ion OH^- membentuk ferro hidroksida $\text{Fe}(\text{OH})_2$. Pada kondisi kekurangan oksigen, anaerobik, ferro hidroksida teroksidasi lebih lanjut membentuk lapisan magnetit Fe_3O_4 . Reaksi yang terjadi dirangkum ke dalam persamaan reaksi berikut:



Terdapat beberapa masalah yang terjadi pada boiler yang berkaitan dengan korosi, antara lain adalah korosi oksigen, korosi *caustic*, *caustic embrittlement*, *hydrogen damage*, *stress corrosion*



cracking, corrosion fatigue, acid attack, chelant corrosion dan coal-ash corrosion.

2.4.1 Korosi Oksigen

Seluruh material yang berada pada sistem boiler rentan terhadap korosi yang disebabkan oleh oksigen. Korosi yang disebabkan oleh oksigen ini akan membentuk suatu pitting. Tabung superheater sangat rentan untuk terkena korosi pitting dikarenakan adanya oksigen dari atmosfer dan juga kelembaban di dalam tabung superheater. Uap jenuh meninggalkan ruang uap dan dihantarkan ke superheater. Pada area dimana kelembaban berkumpul dan lubang dalam terbentuk.

Berikut ini adalah mekanisme terjadinya reaksi pitting yang disebabkan oleh oksigen. Pertama-tama pada reaksi anodik, Fe teroksidasi menjadi Fe^{2+} yang menyebabkan besi larut karena reaksi anoda ini. Reaksi yang terjadi adalah sebagai berikut:



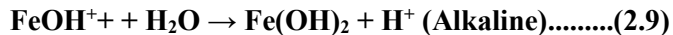
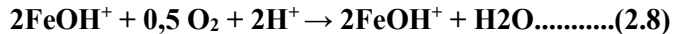
Pada reaksi katodik terjadi reduksi dari oksigen, area anoda dan katoda selanjutnya terbentuk kerana adanya heterogenitas pada permukaan. Reaksi yang terjadi pada katoda adalah sebagai berikut:



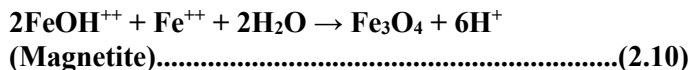
Karena reaksi hidrolisis, pH menurun dan ion Hidrogen mulai terbentuk. Reaksi yang terjadi pada tahap ini adalah sebagai berikut:



Ion hidrogen membentuk molekul gas hidrogen pada lekungan (pit). Sebuah lapisan oksida terbentuk diatas lengkingan korosi berdasarkan reaksi:



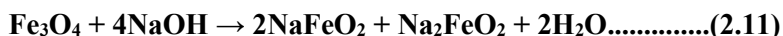
Kondisi asam terbentuk dan pH turun di dalam lengkungan karena adanya ion hidrogen



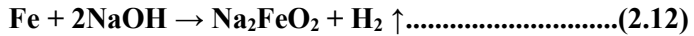
2.4.2 *Caustic Corrosion*

Korosi jenis ini terjadi karena terdapat sodium hidroksida yang dibutuhkan dalam proses. *Caustic* ditambahkan pada boiler untuk mempertahankan lapisan tipis yang protektif dari magnetit pada permukaan dari tabung baja. pH dikontrol dengan sodium hidroksida, masalah baru muncul ketika konsentrasi dari NaOH naik sebesar 25%. Sodium Hidroksida dapat menjadi terkonsentrat karena beberapa mekanisme yang terjadi. Mekanisme yang pertama adalah *Departure from Nucleate Boiling*, yaitu adanya konsentrat *caustic* pada permukaan dan merusak lapisan tipis magnetit. Alasan lainnya adalah karena ada penguapan dari *waterline*. Ketika terdapat *waterline* maka spesies korosi dapat terkonsentrasi dengan penguapan.

Mekanisme *caustic corrosion* dapat dijelaskan ke dalam beberapa tahap, yaitu pertama-tama konsentrasi dari *caustic* yang tinggi menghancurkan lapisan magnetit dan logam dasarnya di serang oleh *caustic*. Reaksi yang terjadi antara lapisan magnetit dan *caustic* adalah sebagai berikut:



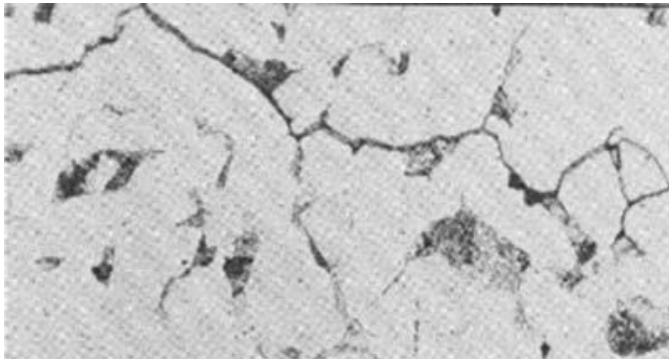
Sedangkan untuk reaksi yang terjadi antara *caustic* dan logam dasar adalah sebagai berikut:



Setelah itu sodium ferit (NaFeO_2) terbentuk dan hidrogen di lepaskan. Sodium ferit tadi berubah menjadi magnetit (Fe_3O_4) dengan hidrolisi ketika mengalami kontak lagi dengan uap boiler. Selanjutnya menyebabkan pipa kehilangan sifat uletnya dan pipa tersebut mulai menipis.

2.4.3 *Caustic Embrittlement*

Merupakan suatu jenis dari SSC (*Stress Corrosion Cracking*) yang terjadi pada baja yang terkena konsentrasi hidroksida yang tinggi pada temperatur 200-250°C. *Caustic Cracking* pada baja terkadang disebut dengan *caustic embrittment*, yaitu suatu type SSC yang muncul pada boiler. Pipa retak akibat pengaruh dari tegangan dan konsentrasi dari hidroksida yang membuat pipa tersebut terkorosi. Ada 2 kondisi agar proses ini dapat terjadi yaitu dengan konsentrasi yang tinggi dari sodium hidroksida (diatas 50.000ppm) dan juga harus berada pada tegangan tinggi. *Caustic Embrittlement* dapat diilustrasikan menurut Gambar2.6.

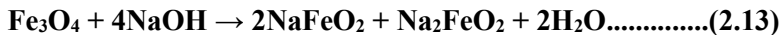


Gambar 2.6 *Caustic Embrittlement (500x)*
(sumber: Zaki Ahmad, 2007)



2.4.4 *Hydrogen Damage*

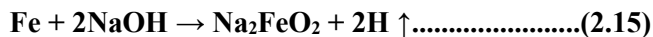
Korosi jenis ini biasanya terjadi pada boiler yang beroperasi pada tekanan yang tinggi (diatas 100 psi). Terjadi ketika permukaan dalam dari boiler terkorosi dan menghasilkan hidrogen. Biasanya muncul pada boiler yang menggunakan air yang bersifat asam (berpH rendah). Awal mula terjadinya korosi jenis ini adalah pada *caustic corrosion* dengan reaksi sebagai berikut:



Lalu kemudian lapisan proteksi hancur dan permukaan setelah terbentuk Fe_3O_4 bereaksi dengan air dan membentuk hidrogen. Reaksi yang terjadi adalah sebagai berikut:



Hidrogen juga dapat diproduksi dari reaksi antara besi dan *caustic*. Reaksi yang terjadi adalah sebagai berikut:

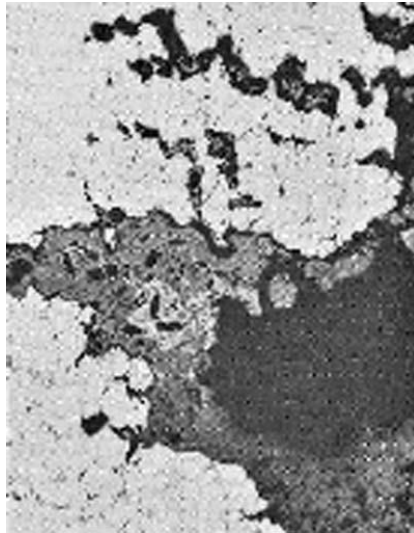


Hidrogen pada bentuk molekul tidak dapat berdifusi ke dalam baja, walaupun dalam bentuk atom hidrogen dapat dengan mudah untuk masuk ke dalam baja. Atom hidrogen bergabung untuk membentuk molekul hidrogen dan membentuk tekanan tinggi pada bagian dalam dan juga menurunkan tegangan patah. Beberapa dari atom hidrogen juga bereaksi dengan endapan kromium karbida pada batas butir. Korosi jenis ini lebih sering menyerang batas butir karena energi permukaan lebih rendah dari butir-butir lainnya.

Ketika retakan-retakan kecil mulai terakumulasi, kekuatan dari pipa tersebut menurun, pipa dapat meledak ketika tekanan dalam yang disebabkan dari akumulasi gas yang terperangkap semakin besar. Retakan yang terjadi biasanya longitudinal dan



menyerupai bentuk retak pecah. Pada Gambar 2.7 diilustrasikan *hidrogen damage* pada oksidasi intergranular.



Gambar 2.7 *Intergranular Oxidation*
(sumber: Port, R.D.1991)

2.4.5 Stress Corrosion Cracking

Fenomena ini dijelaskan dengan retaknya suatu material karena efek gabungan dari tegangan dan korosi (retakan dapat berbentuk intergranular maupun transgranular). *Caustic cracking* merupakan salah satu bentuk dari SSC dan korosi yang terdapat pada permukaan berperan sebagai pemicu tegangan. Retakan pada baja dapat disebabkan pada pengendapan kaustik pada temperatur yang tinggi. Material dengan penambahan 90Cu-10Ni biasanya imun terhadap SSC. Klorida dapat berkonsentrasi dan dapat mengantisipasi adanya oksigen pada daerah tersebut.



2.4.6 Corrosion Fatigue

Merupakan sebuah proses dimana sebuah adanya patah ataupun retak logam yang prematur dan dalam kondisi korosi, lalu terdapat beban siklik yang simultan pada pipa. Retak bermula dari cacat permukaan, berbentuk sumuran serta terjadi penyimpangan . kegagalan oleh korosi ini disebabkan oleh perambatan retak. Retakan2 yang tidak bercabang tegak lurus terhadap permukaan logam dan membentuk suatu kegagalan yang cepat. Pada kasus boiler, konversi logam Fe menjadi magnetit dapat menyebabkan kelelahan korosi jika disitu terdapat tegangan siklis yang cukup kuat. Lapisan oksida yang selanjutnya terbentuk getas dan cenderung rapuh dan rentan retak. Contoh retakan yang disebabkan oleh *corrosion fatigue* dapat dilihat pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8 *Corrosion Fatigue Crack*
(sumber: Port, R.D.1991)



2.4.7 *Acid Attack*

Korosi jenis ini disebabkan oleh serangan permukaan dalam boiler karena pH air di dalam tabung rendah (asam). Semua bagian pada boiler dapat terkena serangan asam. Serangan ini dapat terjadi jika terjadi penyimpangan dari air standar yang harusnya digunakan boiler. Acid attack ini juga biasanya terjadi jika air yang digunakan merupakan air laut (mengandung Cl). Contoh dari *acid attack* ini dapat dilihat pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9 *Acid Attack*
(sumber: Wyncott, D.1979)

2.4.8 *Chelant Corrosion*

Chelant adalah suatu senyawa yang mampu bergabung dengan satu pasangan elektron sehingga membentuk sebuah struktur cincin kompleks yang memiliki stabilitas tinggi. Konsentrasi *chelant* yang tinggi sangat berbahaya dan dapat berlaku sebagai kaustik. *Chelant* dapat dipekatkan dengan penguapan ketika nukleasi didihan terjadi. *Chelant* dapat menyerang magnetit menurut reaksi berikut:



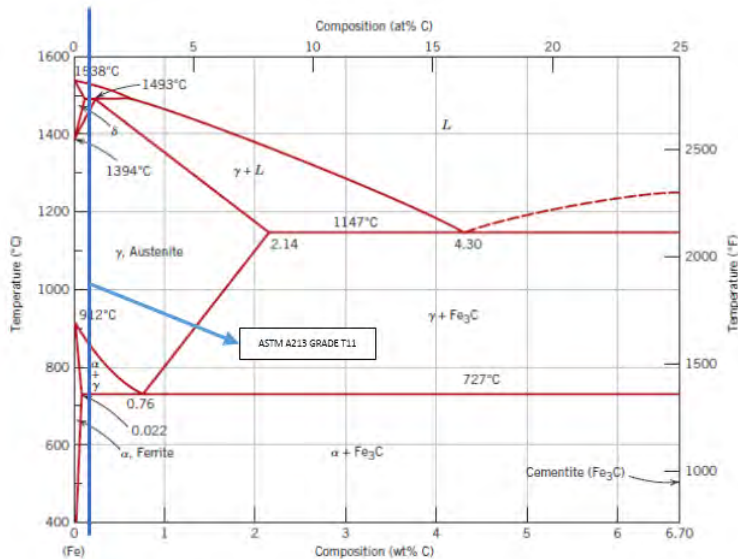
Paduan yang memiliki tembaga ataupun berbasis tembaga tidak boleh terkena *chelant* karena Fe_3O_4 dihilangkan dan korosi dapat muncul dengan sangat cepat.

2.4.9 Coal-Ash Corrosion

Selama pembakaran batubara, konstituen mineral dalam batubara dikenai suhu tinggi ($566\text{-}732^\circ\text{C}$), membebaskan oksida pada permukaan dan senyawa alkali. Senyawa alkali dan sulfur mengembun untuk membentuk senyawa kompleks seperti $\text{K}_3\text{Te}(\text{SO}_4)_3$, yang membentuk slag pada dinding tabung dan membuat menipisnya ketebalan dari dinding. Korosi dari pembakaran batubara dikaitkandengan batu bara yang mengandung lebih dari 3,5% sulfur dan 0,25% klorida.

2.5 Baja

Baja merupakan suatu paduan besi dan karbon yang dapat ditambahkan unsur lain pada saat proses produksinya. Unsur yang ditambahkan biasanya untuk memperoleh suatu sifat tertentu. Maka dari itu baja memiliki banyak sekali jenis yang dapat digunakan. Komposisi baja dapat dikatakan sebagai campuran dari besi Fe dan karbon. Besi dan karbon ini akan membentuk suatu diagram fasa campuran Fe-Fe₃C yang ditunjukkan pada Gambar 2.10



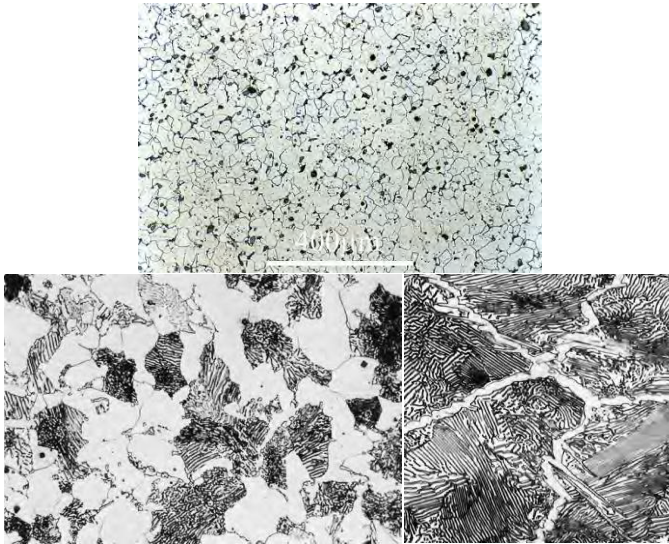
Gambar 2.10 Diagram Fasa Besi-Besi Karbida
(Callister,2007)

Menurut komposisi karbon yang berada di dalam baja, maka baja dibagi menjadi 3 jenis, yaitu:

1. **Baja Karbon Rendah:** kadar karbon sampai dengan 0,30%. Strukturnya terdiri dari ferrit dan sedikit perlit, sehingga baja karbon rendah ini kekuatannya cenderung rendah, lunak, tetapi memiliki keuletan yang tinggi, mudah dibentuk dan di machining.
2. **Baja Karbon Menengah:** kadar karbon 0,30 sampai dengan 0,70%. Terdiri dari ferrit dan perlit tetapi memiliki kandungan perlit yang lebih banyak dibandingkan baja karbon rendah. Baja ini lebih keras dari baja karbon rendah , tetapi lebih getas.



3. **Baja Karbon Tinggi:** kadar karbon lebih dari 0,70%. Memiliki struktur yang lebih keras dan lebih kuat dibandingkan dengan kedua jenis baja karbon lainnya.



Gambar 2.11 Struktur Mikro Pada Baja (kiri: karbon rendah, tengah karbon menengah, kanan karbon tinggi)

(Sumber: Callister, 2007)

Selain itu, baja juga dapat diklasifikasikan berdasar paduan yang terdapat pada baja tersebut, yaitu:

1. **Baja Paduan Rendah** : merupakan sebuah baja paduan dengan kadar unsur paduan yang rendah (kurang dari 10%), dengan ditambahkan paduan memungkinkan untuk memiliki kekuatan dan ketangguhan lebih tinggi dengan kadar karbon yang sama, dan atau memiliki ketangguhan yang lebih tinggi



dibandingkan baja karbon dengan kekuatan yang sama.

2. **Baja Paduan Tinggi:** Merupakan baja paduan dengan unsur paduan yang tinggi (diatas 10%) yang dimungkinkan untuk memiliki sifat khusus tertentu, seperti baja tahan karat, dan sebagainya.

2.6 Pengaruh Unsur Paduan

Beberapa unsur paduan dapat ditambahkan ke dalam material agar material tersebut memiliki sifat yang diinginkan berupa penambahan atau pengurangan suatu sifat. Unsur paduan dan pengaruhnya dijelaskan sebagai berikut:

1. **Karbon :** Karbon merupakan unsur penting di dalam baja karena baja tersusun atas besi (Fe) dan karbon (C). Penambahan karbon digunakan untuk mengeraskan baja. Lebih tinggi kandungan karbon, maka baja semakin keras dan getas. Tetapi semakin banyak kandungan karbon maka keuletan material berkurang.
2. **Silikon :** Silikon (Si) merupakan unsur yang umum terdapat pada setiap baja. Silikon tidak membentuk karbida melainkan larut dalam ferit. Penambahan silikon membuat sifat kekuatan dan ketangguhan baja naik. Tetapi jika kandungan silikon besar (melebihi 0,4%), maka elastisitas dan keuletan dari material turun perlahan.
3. **Mangan :** Mangan (Mn) juga merupakan unsur paduan yang selalu ada pada baja, seperti silikon. Mangan bekerja sebagai deoxidiser. Mangan mengurangi kecenderungan terjadinya *hot shortness* yang ditimbulkan oleh belerang. Mn juga mencegah terbentuknya FeS yang membentuk eutektik oada besi. Adanya mangan



menaikan kekuatan dan kekerasan yang lebih efektif daripada menaikkan kadar karbon.

4. **Fosfor** : Fosfor (P) merupakan salah satu bahan yang cukup berbahaya bila terdapat terlalu banyak di dalam baja. Fosfor dapat mengikat Fe dan menjadi penyebab utama pada perapuhan baja pada keadaan dingin. Kandungan fosfor maksimum dalam baja adalah 0,6. Fosfor berfungsi untuk meningkatkan fluiditas dalam pengecoran logam. Fosfor larut dalam ferit dan menaikkan kekuatan pada baja.
5. **Sulfur** : Sulfur (S) memiliki pengaruh yang hampir sama persis dengan fosfor, yaitu larut di dalam ferrit dan menaikkan kekuatan, dan juga menaikkan kegetasan dalam material. Kandungan sulfur yang terlalu banyak juga membuat baja mudah retak pada saat temperatur tinggi.
6. **Chrom** : Chrom (Cr) di dalam baja dapat membentuk karbida pada besi. Selain itu kromium juga membantu meningkatkan temperatur austenisasi pada baja. Selain itu juga chrom juga meningkatkan ketahan korosi, menaikkan keuletan, ketahanan aus dan kekerasan pada baja.
7. **Molibden** : Molibden (Mo) merupakan paduan yang membentuk karbida. Molibden juga menaikkan kekerasan dan kekuatan pada temperatur tinggi. Dan juga mencegah terjadinya kegetasan pada pemanasan ulang.



2.7 Analisa Kegagalan

Analisa kegagalan adalah kegiatan pemeriksaan/pengujian terhadap suatu komponen yang mengalami kerusakan untuk mencari penyebab terjadinya permasalahan yang sifatnya spesifik. Didukung dengan berbagai referensi, pengamatan dan pengujian laboratorium untuk memperkuat dugaan permasalahan. Kegagalan bisa saja berasal dari manufaktur, perakitan ataupun pengoperasian yang tidak sesuai dengan prosedur, dan tujuan analisa kegagalan untuk mengetahui mekanisme kegagalan. Manfaat yang dihasilkan dari analisa kegagalan dalam jangka pendek adalah perbaikan desain dan proses fabrikasi juga pengoperasian. Untuk jangka panjang bisa di jadikan acuan pengembangan material dan evaluasi untuk memperkirakan kerja suatu material dan memperbaiki sistem perawatan dari material tersebut.

Dengan kata lain, analisa kegagalan berujung pada observasi pada komponen-komponen yang rusak. Pengamatan pola patahan yang rusak adalah kunci bagi seluruh proses analisa kegagalan. Oleh sebab itu, pengamatan secara makroskopis dan mikroskopis harus dilaksanakan secara bertahap. Selain itu pengujian mekanik juga diperlukan karena secara umum kegagalan disebabkan oleh gaya-gaya yang bekerja dari lingkungan kerja komponen. Menurut sumber-sumber penelitian yang ada di dunia industri (Brook & Choudury, 2002). Faktor penyebab kegagalan yang sering terjadi di dunia industri dapat dikarenakan oleh faktor berikut: Faktor kesalahan pemilihan material, Perawatan komponen yang kurang baik, kesalahan dalam perancangan komponen, dan kondisi kerja yang ekstrim.

2.8 Efek Lingkungan

Faktor lingkungan dapat menyebabkan sifat kelelahan dari material. Ada dua jenis pengaruh terhadap material yang dibantu efek lingkungan, yaitu *Thermal Fatigue* dan *Corrosion Fatigue*. *Thermal fatigue* adalah kondisi ketika suatu material diinduksi dengan suhu tinggi dengan tekanan termal yang fluktuatif. Tekanan



termal ini muncul karena ketahanan diri dari material tersebut untuk terjadi ekspansi dimensi dan atau kontraksi yang dapat muncul pada proses yang menggunakan variasi suhu. Besarnya tegangan termal tergantung pada koefisien ekspansi termal dan modulus elastisitas. Sesuai dengan rumus:

$$\sigma = \alpha_l E \Delta T \dots\dots\dots(2.17)$$

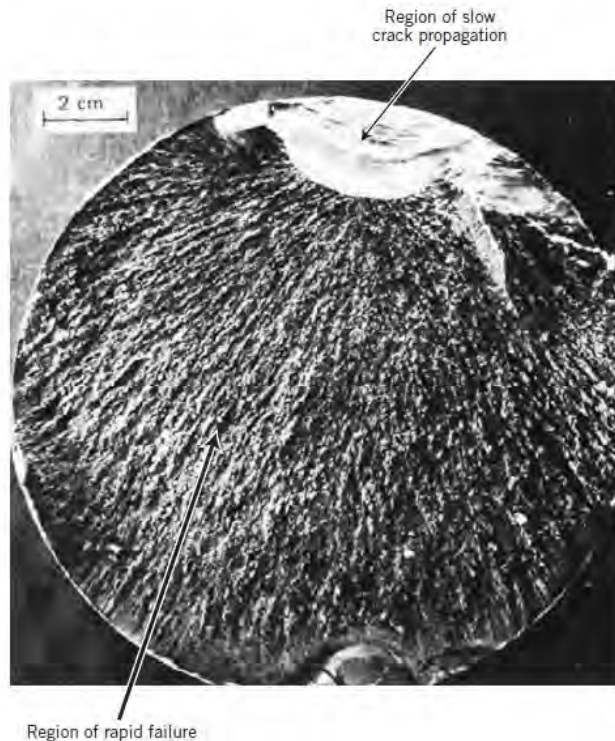
Tentu saja, tegangan termal ini tidak akan muncul jika tidak adanya pengendalian mekanik. Oleh karena itu salah satu cara untuk menghindari kelelahan semacam ini adalah untuk menghilangkan atau mengurangi fluktuasi panas, sehingga memungkinkan material tidak memiliki hambatan dimensi yang besar ketika adanya suhu yang fluktuatif. Cara lain untuk menghindari kelelahan ini adalah dengan memilih bahan yang memiliki sifat fisik yang sesuai dengan penggunaan.

Corrosion fatigue merupakan kegagalan yang terjadi karena adanya tegangan siklik yang simultan dan juga terdapat serangan kimia. Lingkungan Korosif memiliki pengaruh yang merusak dan menghasilkan umur *fatigue* yang lebih pendek. Bahkan pada suasana ruangan normal akan mempengaruhi kelelahan dari beberapa bahan. Lubang kecil dapat terbentuk sebagai akibat dari reaksi kimia dan juga keadaan sekitarnya. Lubang ini akan menjadi titik dari konsentrasi tegangan yang akan muncul dengan *crack*. *Crack* yang merambat secara cepat karena lingkungan ini yang dapat memperpendek umur dari kelelahan tersebut.

Kegagalan fatik atau *fatigue failure* yang di sebabkan oleh crack dapat dibagi menjadi bermacam macam patahan. Patahan yang terjadi dapat terbagi menjadi patahan yang lambat dan patahan yang cepat. Patah lambat biasanya disebabkan karena perambatan dan beban tidak terlalu besar, sehingga area yang mengalami kerusakan berupa berkas halus dan tidak bergranular,



sedangkan bila patah cepat akan membuat berkas patahan berupa granular. Berkas patah cepat dapat dilihat pada Gambar 2.12.



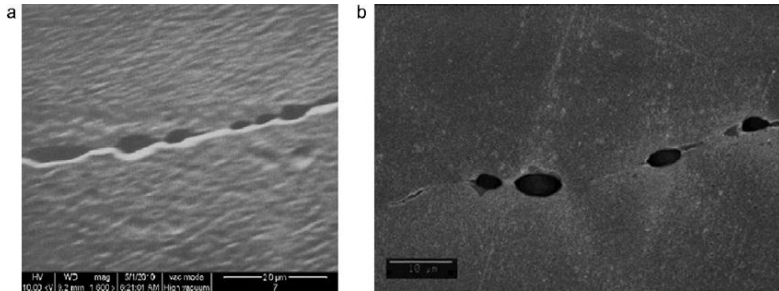
Gambar 2.12 Berkas Patah Cepat
(Callister,2007)

2.9 Creep

Material sering ditempatkan dalam temperatur tinggi dan terkena tekanan mekanik yang statis (misalnya, rotor turbin dalam mesin jet dan generator uap yang mengalami tekanan sentrifugal dan aliran uap tekanan tinggi). Deformasi dari keadaan semacam ini disebut *creep*. *Creep* didefinisikan sebagai deformasi material yang tergantung waktu dan perubahannya permanen ketika mengalami beban konstan ataupun tekanan konstan, *creep*



merupakan fenomena yang tidak diinginkan dan sering menjadi faktor pembatas dari umur suatu komponen. Creep dapat terjadi di semua jenis material, tetapi pada logam, *creep* ini menjadi penting dan fatal jika temperatur operasi berada pada temperatur yang lebih besar atau sekitar 0,4 kali temperatur meltingnya.



Gambar 2.13 Creep
(sumber: Newman)

2.10 Prosedur Perhitungan Batas Butir Plainmetric

Pada metode plainmetric digunakan sebuah lingkaran yang di digambarkan pada struktur mikro yang telah di ketahui. Perbesaran yang diambil adalah jika sudah diberi lingkaran untuk penghitungan, di dalam lingkaran memiliki paling tidak 50 butir. Besarnya lingkaran yang digambarkan adalah sebesar 79,8 mm. Setelah lingkaran digambarkan, jumlah butir dihitug. Jumlah butir dibagi menjadi 2 macam, butir utuh dan butir yang terpotong. Butir yang utuh disebut N_{inside} dan butir yang terpotong disebut $N_{intercepted}$. Setelah dihitug maka dimasukan ke dalam rumus berikut:

$$NA = f(N_{inside} + \frac{N_{intercept}}{2}) \dots \dots \dots (2.18)$$

$$d = \frac{1}{\sqrt{NA}} \dots \dots \dots (2.19)$$

Dimana:

NA= Jumlah butir

f= Jeffries' multiplier

N inside= jumlah butir didalam lingkaran



N intercept= jumlah butir yang memotong lingkaran
D= diameter rata-rata butir

2.11 Pengaruh Grain Terhadap Sifat Mekanik Baja

Pengaruh dari batas butir dari sifat mekanik baja ini sering dikaitkan dengan teori *Hall-Petch*. Teori ini umumnya dikatakan dengan:

$$\sigma_y = \sigma_0 + K_y d^{-1/2} \dots\dots\dots(2.20)$$

Dimana K_y adalah konstanta *Hall-Petch* dan d adalah rata-rata ukuran butir. dari rumus diatas dapat dikatakan bahwa material yang memiliki diameter rata2 lebih besar akan memiliki nilai kekuatan yang lebih kecil.

2.12 Penelitian Sebelumnya

Tabel 2.4 Tabel Penelitian Yang Telah Dilakukan

No.	Nama	Judul	Hasil
1.	-Md.Mujibur Rahman -Ahmad Kamal Kadir	<i>Failure analysis of high temperature superheater tube (HTS) of a pulverized coal-fired power station</i>	Korosi timbul karena mulur dan menyusutnya tube yang disebabkan karena operasional yang tidak kontinu.
2.	-A. Movahedi-Rad -S.S. Plasseyed -M. Attarian	<i>Failure Analysis of Superheater Tube</i>	Kegagalan terjadi karena korosi akibat pemakaian bahan bakar yang kurang baik dan



Laporan Tugas Akhir
Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS

			diperparah dengan kondisi terpapar panas yang terus menerus.
3.	-H. Shokouhmand -B. Ghadimi -R. Espanani	<i>Failure analysis and retrofitting of superheater tubes in utilityboiler</i>	Kerusakan teridentifikasi dengan adanya tube yang terbungkus dengan endapan. Struktur mikro menunjukkan speriodasi pada patahan. Terjadi keretakan sebelum kerusakan.
4.	Kautsari Anggun Karisma	Analisa Kegagalan dan Perkiraan Umur Sisa Pipa Air pada Boiler Unit 1 di PLTU PT PJB UP Gresik	Adanya bulging yang teridentifikasi karena korosi oksigen secara merata dan juga adanya fluktuasi dari temperatur.
5.	Gizela Zada	Analisa Kegagalan Cap Nozzle Burner	Kegagalan disebabkan oleh adanya korosi



		Boiler pada PLTU Unit 1 di PT PJB Gresik	temperatur tinggi dan juga paparan panas tinggi secara terus menerus.
6.	Denny Alfianto Ibni	Analisa Kegagalan dan Perkiraan Umur Sisa Pipa Air pada Boiler 31F-4 UT-1 di PT Badak NGL Bontang.	Kegagalan berupa semburan dari dalam yang disebabkan oleh korosi yang terjadi karena paparan temperatur tinggi secara terus menerus. Korosi yang terjadi merupakan korosi oksida dan galvanic dengan Cu.



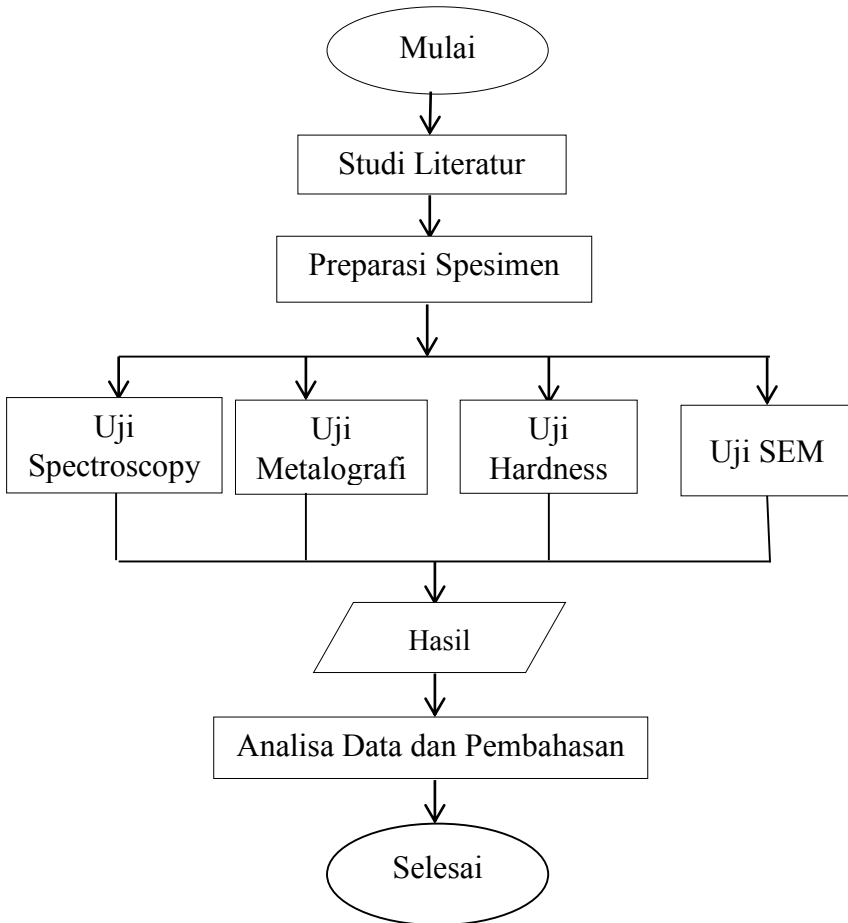
Laporan Tugas Akhir
Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB III

METODOLOGI PERCOBAAN

3.1 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian



3.2 Bahan Penelitian

Bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah *Boiler Superheater Tube* ASTM A213 Grade T11 dengan komposisi kimia seperti pada Tabel 3.1 dan spesifikasi sifat mekanik seperti Tabel 3.2.

Tabel 3.1 Spesifikasi Komposisi Kimia ASTM A213 Grade T11

Komposisi Kimia	Nilai Persentase
C	0,05-0,15
Si	0,05-1,50
Mn	0,30-0,60
P	0,025
S	0,025
Ni	-
Cr	1,00-1,50
Mo	0,44-0,65
Al	-
Fe	<i>balance</i>

(Sumber: ASTM A213/A213M-06a)

Tabel 3.2 Spesifikasi Sifat Mekanik ASTM A213 Grade T11

Sifat Mekanik	Nilai
Kekuatan Tarik	415 Mpa
Kekuatan Luluh	220 Mpa
Kekerasan	85 HRB
Elongasi	30 %
<i>Delivery Condition</i>	<i>Annealed</i>
Ketahanan Deformasi panas	570 °C

(Sumber: ASTM A213/A213M-06a)



3.3 Alat Penelitian

Alat-alat yang digunakan untuk melakukan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mesin Spektrometer
2. Kertas gosok *grade* 80 sampai dengan *grade* 2000
3. Mesin *Grinding*
4. Mesin *Polish*
5. Mikroskop Optik
6. Kamera Digital
7. Mesin Uji Kekerasan
8. Mesin SEM

3.4 Tahap Penelitian

3.4.1 Studi Literatur dan Preparasi Spesimen

Pertama dilakukan Studi literatur dan pengambilan sampel yang diteliti di PUSPITEK, Serpong, Tangerang, Banten. Setelah dilakukan pengambilan maka selanjutnya dilakukan persiapan spesimen sebelum dilakukan pengujian untuk menentukan kegagalan apa yang terjadi pada *superheater tube boiler*.

3.4.2 Pengamatan Secara Makroskopis

Pengamatan makroskopis ini dilakukan untuk mengetahui keadaan fisik dari spesimen yang didapatkan. Setelah dilakukan pengamatan selanjutnya didokumentasikan menggunakan kamera digital. Gambar 3.2 menunjukan material *superheater* yang mengalami kerusakan.



Gambar 3.2 Tube Superheater yang Mengalami Kerusakan
(sumber:BPPT)

3.4.3 Pengujian Komposisi Kimia

Komposisi kimia suatu bahan diidentifikasi dengan alat OES atau *Spectrometer*. Setelah dilakukan pengujian maka diketahui komposisi kimia dari ASTM A213 Grade T11 secara kuantitatif. Mekanisme dari uji komposisi menggunakan OES adalah memantulkan berkas elektron dari spesimen yang kemudian ditangkap oleh reseptor dan hasilnya langsung di tampilkan ke dalam komputer. Hasil dari uji ini menunjukan unsur yang terdapat di dalam spesimen dan kuantitasnya. Mesin uji komposisi kimia yang digunakan adalah *PMI-MasterPro* yang dilakukan di PUSPITEK Tangerang. Gambar 3.3 menunjukan mesin uji spektroskopi yang digunakan.



Gambar 3.3 Mesin Uji Spektroskopi

3.4.4 Pengujian Metalografi

Pengamatan mikroskopik dengan menggunakan pengujian metalografi dilakukan untuk menganalisa suatu fasa, bentuk, dan ukuran dari struktur mikro yang terdapat pada material yang masih bagus dan material yang terjadi kerusakan.

Pengujian metalografi ditujukan untuk melihat struktur logam secara makro ataupun mikro yang terdapat pada komponen menggunakan mikroskop optik. Pengamatan dari struktur tersebut akan memberikan informasi tentang tipe, ukuran butir distribusi, dan jumlahnya. Yang nantinya memberikan nilai property dari material tersebut. Metalografi ini mengambil acuan dari *ASM Handbook* Volume 9 dengan proses sebagai berikut:

1. Pemotongan

Dilakukan untuk mengambil sampel pada daerah yang masih bagus, daerah tepi kerusakan dan daerah yang mengalami kerusakan pada *tube*, memotong melakukan gergaji manual.



2. Mounting

Mounting yang dilakukan pada sampel bertujuan untuk mempermudah proses berikutnya yaitu *grinding*. Jenis *mounting* yang digunakan adalah resin akrilik.

3. Grinding

Grinding dilakukan dengan kertas gosok (amplas) silikon karbida dengan pendinginan air yang juga berlaku sebagai pelumas. Dilakukan secara bertahap dari mulai dari *grade* 80, 120, 240, 320, 400, 600, 800, 1000, 1200, 1500 dan 2000 hingga didapatkan permukaan yang halus dan rata.

4. Polishing

Pemolesan dilakukan dengan pasta alumina untuk mendapatkan permukaan betul-betul rata dan bebas dari goresan. Kecepatan mesin poles sekitar 150 rpm dengan tekanan pada sampel yang kecil.

5. Etching

Pencelupan permukaan spesimen ke dalam larutan nital untuk mengeluarkan fasa dari spesimen tersebut.

Setelah itu dilakukan pemeriksaan di bawah mikroskop. Mikroskop optik yang digunakan adalah *Olympus BX51M-RF* yang terdapat pada Laboratorium Metalurgi. Mikroskop optik yang digunakan ditampilkan pada Gambar 3.4.



Gambar 3.4 Mikroskop Optik



3.4.5 Pengujian Hardness

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui kekerasan material setelah melalui proses pada industri untuk selanjutnya dibandingkan dengan standar material yang terdapat pada ASTM. Pada pengujian hardness digunakan mesin uji hardness dengan metode *Rockwell*. Uji *Rockwell* dilakukan dengan penekanan sebuah bola baja yang terbuat dari baja yang telah dikeraskan dengan diameter tertentu, oleh gaya tekan secara statis kedalam permukaan logam yang diuji harus rata dan bersih. Pengujian hardness yang dilakukan adalah pada permukaan diameter. Sampel yang dilakukan uji hardness sebanyak 3 buah yaitu pada bagian yang masih bagus, di tepi terjadinya kerusakan dan pada bagian yang terjadi kerusakan. Alat uji kekerasan yang dipakai merupakan model *HBRV-187 5*. Ilustrasi peralatan uji *Hardness* dapat dilihat pada Gambar 3.5.



Gambar 3.5 Ilustrasi Mesin Uji Hardness



3.4.6 Pengujian SEM

Scanning Electron microscope (SEM) merupakan salah satu alat pengujian material yang biasanya digunakan untuk mengetahui profil permukaan dan patahan. Hasil dari mesin SEM berupa gambar 3-dimensi yang menunjukkan permukaan dari spesimen. Spesimen yang akan dilakukan uji sem diambil dari tepi bagian yang mengalami kerusakan. Mesin SEM yang digunakan merupakan mesin SEM dengan tipe *SEM Inspect S50*. Spesimen yang dilakukan uji SEM dapat dilihat pada Gambar 3.6 dan mesin uji SEM dapat dilihat pada Gambar 3.7.



Gambar 3.6 Spesimen Uji SEM



Gambar 3.7 Mesin Uji SEM



3.5 Rancangan Eksperimen

Spesimen yang dilakukan eksperimen dibagi menjadi 3 jenis sampel yang diuji menurut Tabel 3.3.

Tabel 3.3 Rancangan Eksperimen yang dilakukan

Jenis Spesimen	Uji Komposisi Kimia	Uji Metalografi	Uji Kekerasan	Uji SEM
Bagian 1 (Tempat terjadinya kerusakan)	•	•	•	-
Bagian 2 (Tepi Terjadinya Kerusakan)	-	•	•	-
Bagian 2 (Tepi Terjadinya Kerusakan)	-	•	•	•

Keterangan

• = dilakukan pengujian

- = tidak dilakukan pengujian



Laporan Tugas Akhir
Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB IV

ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Analisa Pengujian

4.1.1 Hasil Pengujian Komposisi Kimia

Berikut adalah hasil uji komposisi spektrometer yang telah dilakukan ditampilkan dalam Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Hasil Uji Spektrometer

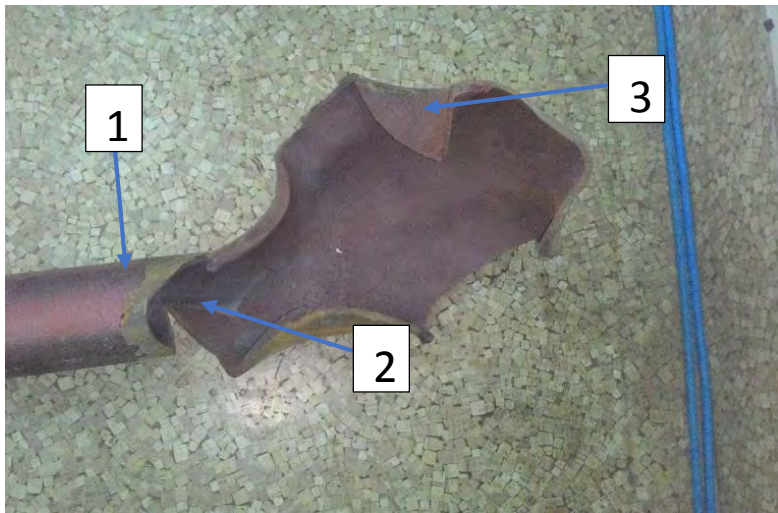
Unsur	Hasil Uji	ASTM A213
C	0,126	0,05-0,15
Si	0,17	0,25-1,00
Mn	0,541	0,3-0,6
P	0,0309	0,025 max
S	0,0081	0,025 max
Cr	1,09	1,0-1,5
Mo	0,308	0,44-0,65
Fe	Balance	Balance

Dari hasil uji spektrometer, dapat dilihat bahwa hasil uji spesimen dari benda yang mengalami kegagalan mendekati standar ASTM A213 Grade T11. Meskipun kandungan fosfor dan molybden tidak masuk batas komposisi, tetapi material ini tetap merupakan ASTM A213 Grade T11 karena fosfor dan molybden bukan penyusun utama dari ASTM A213 Grade T11. Bagian yang diperiksa merupakan bagian luar dari *tube*, yang mengalami paparan panas batu bara secara langsung. ASTM A213 Grade T11 ini termasuk ke dalam golongan baja karbon rendah. Baja karbon rendah sendiri memiliki keuletan yang tinggi, kekerasan yang rendah, mudah di las tetapi memiliki sifat *machinability* yang rendah.



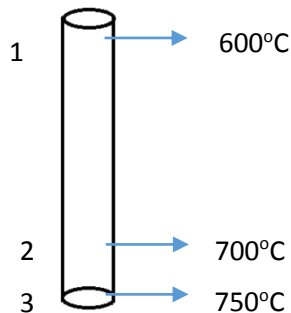
4.1.2 Hasil Pengujian Metalografi

Pada pengujian metalografi yang telah dilakukan terlihat struktur mikro dari spesimen yang diamati dibawah mikroskop optik. Pengujian metalografi ini menggunakan standar ASTM E3. Struktur mikro didapatkan dengan penambahan larutan etsa nital pada permukaan yang telah di uji. Hasil metalografi dibagi menjadi 3 bagian yang kemudian diilustrasikan pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1 Bagian Spesimen yang dilakukan pengujian metalografi (1: masih bagus, 2: tepi kerusakan, 3: tempat kerusakan)

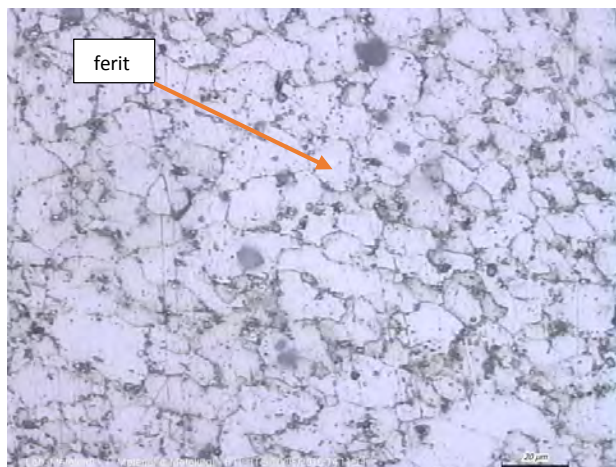
Bagian 1 merupakan bagian yang masih bagus dari pipa yang mengalami kerusakan. Bagian 1 ini diambil pada 30cm dari tepi kerusakan. Sedangkan bagian 2 merupakan bagian di tepi yang mengalami kerusakan. Dan bagian 3 merupakan tempat terjadinya kerusakan dengan distribusi Temperatur yang digambarkan pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2 Distribusi Temperatur pada Bagian 1,2, dan 3

4.1.2.1 Hasil Metalografi Bagian 1

Dari hasil pengujian struktur mikro pada bagian 1 (bagian yang masih bagus), didapatkan gambar sebagai berikut :



Gambar 4.3 Struktur mikro bagian 1 dengan perbesaran 500x

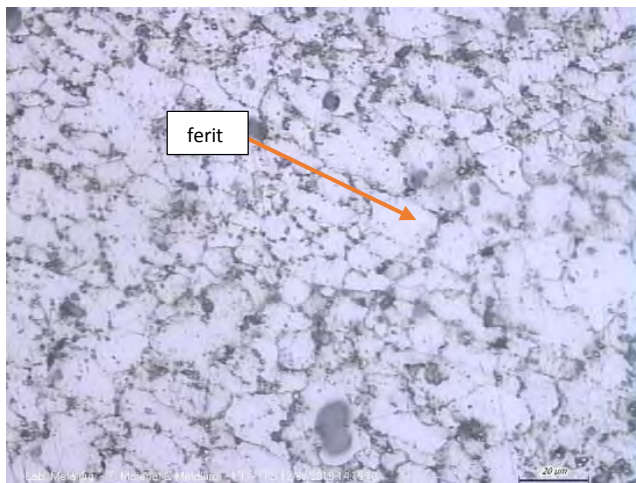
ASTM A213 memiliki fasa ferit-perlit, dan dari struktur mikro diatas dapat dilihat bahwa fasa yang tampak berupa ferit.



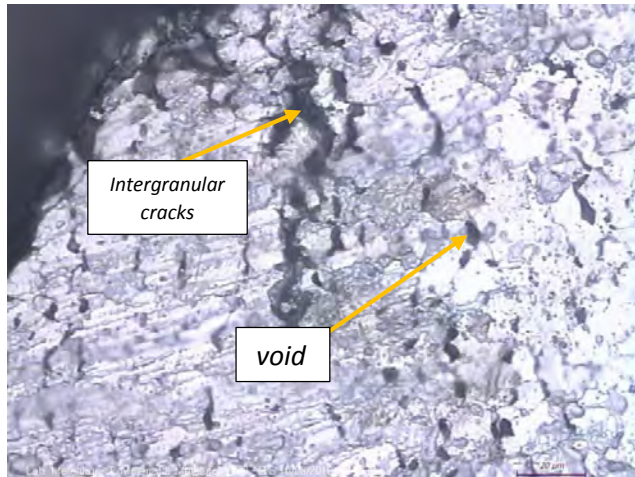
Fasa ferit ditampilkan dengan gambar terang, sedangkan fasa perlit terlihat dengan warna yang lebih gelap dan lamelar (struktur gelap-terang berlapis). Tetapi karena jumlah karbon yang sangat kecil, fasa perlit tidak tampak dalam gambar. Struktur ferit merupakan struktur yang ulet sedangkan struktur perlit lebih getas dan keras, menjadikan material ASTM A213 merupakan sebuah material yang ulet dengan tingkat kekuatan yang tidak begitu baik.

4.1.2.2 Hasil Metalografi Bagian 2

Dari hasil pengujian struktur mikro pada bagian 2 (bagian tepi kerusakan), didapatkan gambar sebagai berikut :



Gambar 4.4 Struktur Mikro bagian 2 dengan perbesaran 500x



Gambar 4.5 Struktur Mikro bagian 2 dengan perbesaran 500x

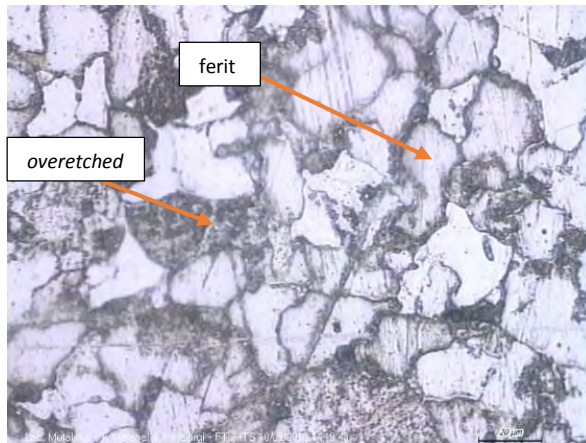
Dapat dilihat pada Gambar 4.3 bahwa struktur mikro yang terdapat pada bagian 2 tidak jauh berbeda dengan struktur mikro pada bagian 1 dengan fasa penyusun yang tampak adalah ferit. Sama seperti pada bagian 1, penyusun dari ASTM A213 merupakan ferit dan perlit tetapi karena kadar karbon yang terlalu rendah, menjadikan struktur perlit tidak tampak.

Dari Gambar 4.4 diatas dapat dilihat bahwa struktur mikro yang terdapat pada bagian 2 ini memiliki *intergranular cracks* dan *void*.

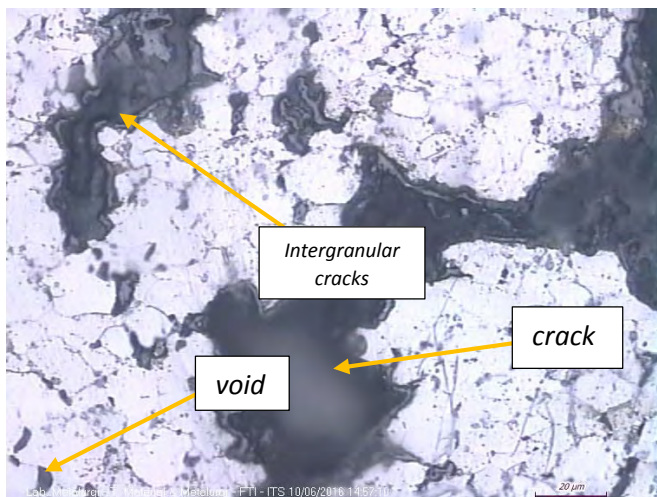


4.1.2.3 Hasil Metalografi Bagian 3

Dari hasil pengujian struktur mikro pada bagian 3 (bagian yang pecah), didapatkan gambar sebagai berikut :



Gambar 4.6 Struktur mikro bagian 3 dengan perbesaran 500x



Gambar 4.7 Struktur mikro bagian 3 dengan perbesaran 500x



Pada struktur mikro yang terdapat pada bagian 3 yang ditunjukkan pada Gambar 4.5 dapat terlihat bahwa butir lebih besar dibandingkan dengan bagian 1 maupun bagian 2. Struktur mikro masi didominasi oleh ferit (berwarna putih) dengan beberapa bagian *overetched* (bagian hitam).

Sedangkan pada struktur mikro yang ditampilkan pada Gambar 4.6 dapat dilihat bahwa struktur mikro yang ada di bagian 3 ini memiliki *intergranular crack*, *void*, dan *crack*.

4.1.3 Hasil Penghitungan Batas Butir

Setelah melakukan pengujian Metalografi dan mendapatkan hasil struktur mikro, kemudian ditambahkan penghitungan untuk ukuran batas batas butir pada bagian 1,2 dan 3 dengan menggunakan standar ASTM E112. Metode yang digunakan adalah metode *Plainmetric*, dengan mengacu pada *Jeffrie's Procedure*.

Dari hasil perhitungan yang telah dilakukan, diinterpretasikan ke dalam Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Data hasil perhitungan ukuran diameter butir

No.	Bagian Spesimen	Rata-rata diameter (mm)
1.	Bagian 1	0,0213
2.	Bagian 2	0,0236
3.	Bagian 3	0,0308

Dari hasil perhitungan diameter butir didapatkan bahwa diameter bagian 1 dan 2 hampir sama, sedangkan terjadi kenaikan pada diameter bagian 3.

4.1.4 Hasil Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan bertujuan untuk mengetahui distribusi dari kekerasan pada masing masing daerah pipa yang rusak. Pengujian ini dilakukan dengan standar kekerasan *Rockwell*



dengan mengacu pada ASTM E10. Hasil pengujian kekerasan ditampilkan pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Rata-rata hasil Uji Kekerasan

Material	ASTM A213 T11	Bagian 1	Bagian 2	Bagian 3
Hardness Rockwell Number rata- rata	85 HRB	52 HRB	49 HRB	25,5 HRB

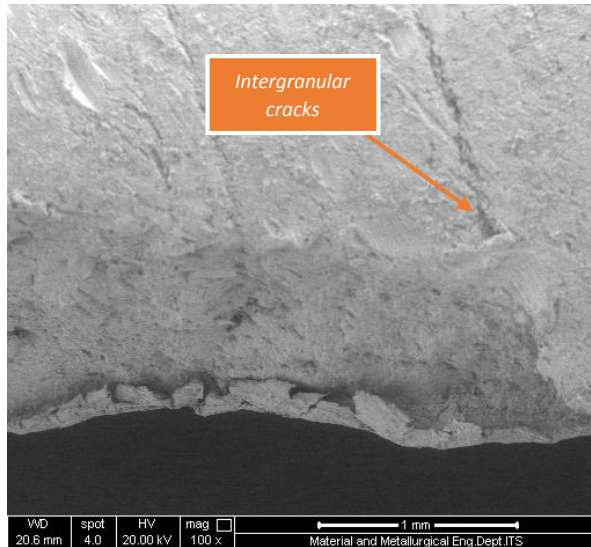
Dari hasil pengujian kekerasan yang telah dilakukan dapat dilihat bahwa bagian 1 memiliki kekerasan yang paling tinggi diikuti bagian 2 lalu bagian 3. Terlihat tren penurunan kekerasan dari bagian 1 ke bagian 3.

4.1.5 Hasil Pengujian SEM

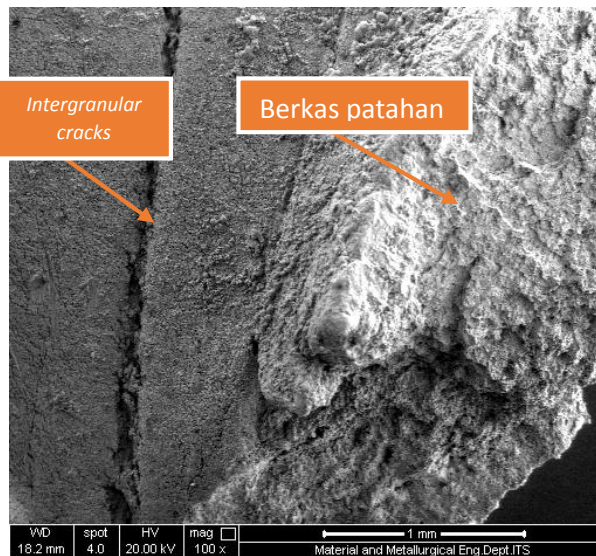
Pengujian SEM (*Scanning Electron Microscope*) hanya dilakukan pada bagian yang rusak (bagian 3). Pengujian Scanning electron microscope digunakan untuk mencari kondisi permukaan serta morfologi permukaan pada benda. Pengujian SEM dilakukan dalam 2 titik yang merupakan bagian dalam dan bagian luar. Pengujian SEM dilakukan dengan perbesaran 100X. Bagian yang dilakukan hasil uji SEM dapat dilihat pada Gambar 4.7. Hasil uji SEM bagian dalam ditampilkan pada Gambar 4.8 dan bagian luar pada Gambar 4.9.



Gambar 4.8 Daerah yang di lakukan uji SEM



Gambar 4.9 Hasil Pengujian SEM pada bagian luar



Gambar 4.10 Hasil pengujian SEM bagian dalam



Pada hasil pengujian SEM dengan perbesaran 100x dilakukan pada daerah dalam dan daerah luar pada bagian 3 (bagian yang mengalami kegagalan). Dapat dilihat beberapa profil permukaan yaitu dengan adanya *intergranular crack* yang tersebar di permukaan bagian dalam maupun bagian luar dari material yang mengalami kerusakan. *Intergranular crack* yang terjadi merupakan *intergranular crack* yang hanya terdapat pada permukaan dan tidak menembus ke permukaan sebaliknya. *Intergranular crack* pada bagian dalam terlihat lebih sedikit dibanding bagian luar.

Dari Gambar 4.9 dapat dilihat bahwa berkas patahan yang terjadi berbentuk granular dan tidak mengkilap. Hal ini mengatakan bahwa patahan yang terjadi pada benda tersebut merupakan patahan yang terjadi secara cepat (*rapid failure*). *Rapid failure* ini terjadi karena penjururan *crack* dari awal terjadinya *crack* sampai terjadi kerusakan berjalan dengan cepat.

4.2 Pembahasan

Pembahasan diawali dengan pengujian spektrometer, dapat dilihat bahwa pada Tabel 4.1 hasil uji spesimen dari benda yang mengalami kegagalan mendekati standar ASTM A213 Grade T11. ASTM A213 Grade T11 ini termasuk ke dalam golongan baja karbon rendah. Baja karbon rendah sendiri memiliki keuletan yang tinggi, kekerasan yang rendah, mudah di las tetapi memiliki sifat *machinability* yang rendah. Setelah mengetahui hasil spektrometer yang menunjukkan bahwa material tersebut adalah ASTM A213 Grade T11 selanjutnya dilakukan pengujian metalografi untuk mengetahui struktur mikro yang terdapat pada material yang mengalami kerusakan. Pengujian metalografi yang dilakukan dibagi ke dalam 3 bagian seperti yang ditampilkan pada Gambar 4.1. ASTM A213 memiliki fasa ferit-perlit, dan dari struktur mikro pada bagian 1 yang ditunjukkan pada Gambar 4.3 dapat dilihat bahwa fasa yang tampak berupa ferit. Fasa ferit ditampilkan dengan gambar terang, sedangkan fasa perlit terlihat dengan warna yang lebih gelap dan lamelar (struktur gelap-terang berlapis). Tetapi karena jumlah karbon yang sangat kecil, fasa perlit tidak



tampak dalam gambar. Pada struktur mikro bagian 1 dan 2 terlihat bahwa struktur mikro memiliki grain yang lebih kecil dibandingkan ketika melihat pada gambar struktur mikro bagian 3 yang ditunjukkan pada Gambar 4.7. Pada bagian 3 dapat disimpulkan bahwa terjadi deformasi dan perbesaran yang cukup besar pada ukuran butir, sedangkan fasa penyusun yang terlihat tetap yaitu ferit.

Setelah itu dilakukanlah perhitungan batas butir sesuai dengan ASTM E112 dan dapat dilihat dalam Tabel 4.2 bahwa diameter rata-rata butir pada bagian 1 yang paling kecil dan bagian 3 merupakan yang paling besar dengan bagian 2 di antaranya. Perbesaran butir terjadi karena adanya pemanasan yang terus menerus dalam waktu yang lama. Keadaan material saat pemanasan boiler awal juga langsung dengan kenaikan panas yang tinggi sehingga bagian 3 yang merupakan bagian yang bawah dikenakan panas yang melebihi temperatur ketahanan panas dari ASTM A213 Grade T11 itu sendiri. Paparan panas yang terus menerus dalam temperatur tersebut akan menyebabkan perubahan struktur, yakni terjadinya perbesaran butiran pada material tersebut. Transformasi yang terjadi hanyalah transformasi struktur saja dan bukan transformasi fasa dari material tersebut. Bagian 3 memiliki butiran yang lebih besar dibandingkan butir pada bagian 1 dan bagian 2 karena bagian 3 lebih dekat dengan sumber panas batubara, sehingga temperatur yang mengenai bagian 3 lebih tinggi. Paparan panas yang terjadi adalah sekitar 540°C dalam kondisi ideal dan dalam kenyataannya temperatur yang digunakan melebihi dari temperatur ketahanan panas dari material yaitu sekitar 570°C (temperatur yang digunakan sekitar 750°C).

Pada metalografi bagian 2 yang ditunjukkan pada Gambar 4.5 dapat terlihat adanya *intergranular crack* dan *void*. *Void* merupakan sebuah rongga kosong yang terdapat pada batas butir sedangkan *intergranular crack* adalah *void* yang bergabung menjadi suatu muluran memanjang pada batas butir. *Intergranular crack* yang terlihat masih merupakan *intergranular crack* yang pendek dan belum menyebar. Kedalaman *intergranular crack* ini



masih cenderung dangkal dan belum masuk jauh dan merusak struktur yang lainnya. Sedangkan pada bagian 3 yang ditunjukkan pada Gambar 4.8 dilihat bahwa struktur mikro yang ada di bagian 3 ini memiliki *intergranular crack*, *void*, dan *crack*. *Intergranular crack* dan *void* yang ada pada bagian 3 ini mirip dengan yang ada di bagian 2. Perbedaannya adalah dengan munculnya *crack* (retak), retak ini merupakan akibat dari *intergranular crack* yang menjalar secara cepat.

Dari hasil pengujian kekerasan yang ditampilkan pada Tabel 4.3 dapat dilihat bahwa nilai kekerasan pada spesimen menurun, penurunan yang terjadi cukup signifikan. Hal ini selaras dengan teori *Hall-Petch* dimana dikatakan bahwa semakin besar butir, maka kekerasan, kekuatan, serta ketangguhan material akan menurun dan berlaku sebaliknya. Penurunan kekerasan tidak semata-mata hanya terjadi karena adanya perbesaran butir, tetapi dengan adanya pengeroposan pada material yang dapat dilihat dari hasil metalografi pada Gambar 4.5 dan Gambar 4.7 yang menunjukkan material tersebut sudah memiliki *void* dan *crack*. Keberadaan *void* dan *crack* ini membuat material tersebut menjadi rapuh, sehingga kekuatannya menurun dengan signifikan.

Berdasarkan hasil pengujian SEM yang ditunjukkan dengan Gambar 4.9 dan Gambar 4.10, dapat dilihat bahwa terdapat *intergranular crack*. *Intergranular crack* yang terdapat pada bagian 3 ini terdapat di bagian luar maupun dalam, tetapi lebih banyak terdapat pada bagian luar. *Intergranular crack* ini ditimbulkan karena adanya aliran panas yang fluktuatif menyebabkan benda tersebut mengalami *Thermal Fatigue*. Temperatur pengoperasian yang dilakukan biasanya berlebih sehingga benda melewati temperatur ketahanan panasnya (diatas 570°C) sehingga membuat benda ini mudah terdeformasi, dan karena deformasi yang terus menerus menyebabkan benda tersebut *fatigue*. *Thermal Fatigue* ini membuat benda mulur ketika terkena panas dan menyusut ketika panas tersebut berkurang ataupun hilang. Fenomena ini disebut pemuluran atau *creep* yang menimbulkan *void*. *Void* muncul pada batas butir dan sejalan



waktu *void* semakin banyak dan bertemu dengan *void* yang lain. Kumpulan *void* ini menjalar di batas butir dan membentuk *Intergranular Crack*. *Intergranular crack* yang terjadi di banyak tempat menyebabkan material itu menjadi rentan, *intergranular crack* ini dapat bergabung dengan *intergranular crack* yang lain membentuk suatu *crack*. Jika *crack* ini terbentuk, besar kemungkinan suatu material mengalami kegagalan.



Laporan Tugas Akhir
Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS

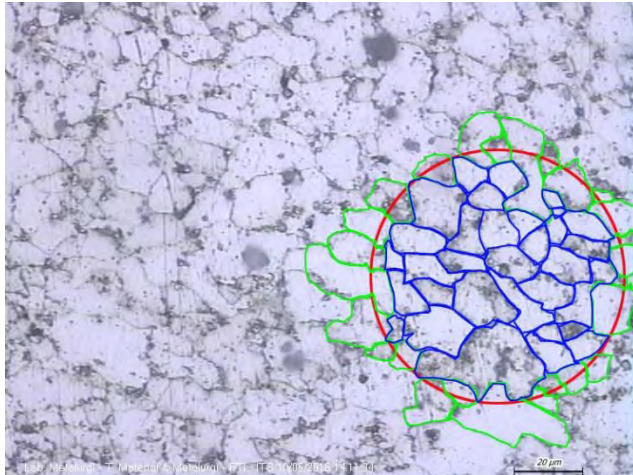
\\
\\

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

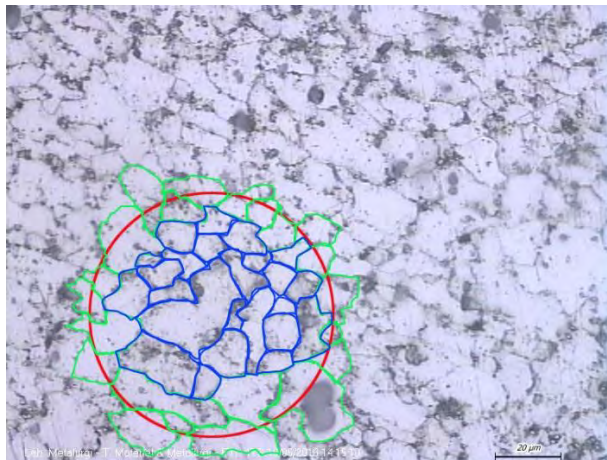
LAMPIRAN

A. Gambar Perhitungan Ukuran Butir

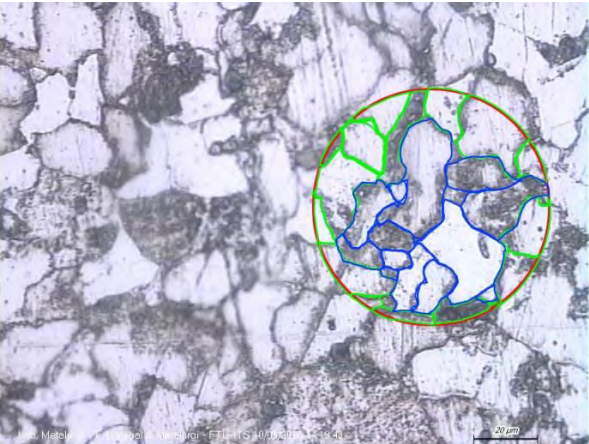
1. Bagian 1



2. Bagian 2



3. Bagian 3



B. Jeffries' multiplier

TABLE 5 Relationship Between Magnification Used and Jeffries' Multiplier, f , for an Area of 5000 mm² (a Circle of 79.8-mm Diameter) ($f = 0.0002 M^2$)

Magnification Used, M	Jeffries' Multiplier, f , to Obtain Grains/mm ²
1	0.0002
10	0.02
25	0.125
50	0.5
75 ^A	1.125
100	2.0
150	4.5
200	8.0
250	12.5
300	18.0
500	50.0
750	112.5
1000	200.0

^A At 75 diameters magnification, Jeffries' multiplier, f , becomes unity if the area used is 5625 mm² (a circle of 84.5-mm diameter).

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dalam analisa kegagalan pada *superheater tube boiler* tipe ASTM A112 grade T11 dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Hasil analisa metalografi pada daerah yang tidak mengalami kegagalan, fasa yang tampak merupakan ferit dengan diameter rata2 butir sebesar 0,0213 mm dan memiliki kekerasan sebesar 52 HRB, pada tepi pipa yang pecah fasa yang tampak pada metalografi juga merupakan ferit dengan rata-rata diameter butir sebesar 0,02357 mm dan memiliki kekerasan sebesar 49 HRB. Pada daerah yang mengalami kerusakan didapatkan bahwa fasa yang tampak merupakan ferit dengan rata-rata diameter sebesar 0,0308 mm dengan kekerasan sebesar 25,5 HRB. Pada hasil SEM terlihat adanya crack dan berkas patahan berupa granular.
2. Penyebab terjadinya kegagalan pada pipa *superheater* dikarenakan adanya *creep* yang menjulur dan mengakibatkan *crack* sebagai awal pecahnya pipa.
3. Mekanisme terjadinya *creep* berawal dari adanya kelelahan pada temperatur tinggi, yang mengakibatkan terbentuknya *creep void* pada batas butir. *Void* akan saling bertemu dan bergabung membentuk *intergranular crack*. *Intergranular crack* yang bergabung akan membentuk *crack* yang makin lama makin besar. Karena banyaknya *crack* maka material ini menjadi rentan dan terjadi burst (pecah).

5.2 Saran

1. Sebaiknya dilakukan kontrol temperatur untuk menjaga agar tidak *overheat* (tidak boleh lebih dari 570) sehingga benda tidak menimbulkan potensi *creep*.



Proposal Tugas Akhir
Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS

2. Pemanasan sebaiknya dilakukan perlahan-lahan dan tidak langsung dipaparkan dengan temperatur tinggi.
3. Untuk menghindari kegagalan serupa, sebaiknya dilakukan pemilihan ulang material dan memilih material yang memiliki ketahanan deformasi panas yang tinggi.

DAFTAR PUSTAKA

- _____. (1997). ***Guideline for Gas and Oil Emission Factors for Industrial, Commercial, and Institutional (ICI) Boilers.*** Virginia.
- _____. (1998). ***Our Boilers and Enviromental Equipment.*** Ohio: Babcox and Wilcox Company.
- _____. (2003). ***E112 Standard Test Methods for Determining Average Grain Size.*** West Conshohocken: ASTM International.
- _____. (2006). ***A213 Standard Spesification for Seamless Ferritic and Austenitic Alloy-Steel Boiler, Superheater, adn Heat-Exchanger Tube.*** New York: ASTM International.
- Ahmad, Z. (2006). ***Principles of Corrosion Engineering and Corrosion Control.*** London: Butterworth-Heinemann.
- Amstrong, R. (2014). ***Engineering Science Aspects of The Hall-Petch Relation.*** Maryland.
- Chandra, K., Kain, V., & Dey, G. (2010). ***Failure of 2.25Cr–1Mo Steel Superheater Tubes in A Fluidized Bed.***
- Elie Tawil, P. (2009). ***Boiler Clasification and Application.*** New York: CEDengineering.com.
- Higgins, R. (1999). ***Engineering Metalurgy Part 1.*** London: Arnold.
- Patel, R. C. (1997). ***Elements of Heat Engines Voll.*** Vadodara: Acharya Publications.

Psylaki, P., Pantazopoulos, G., & H.Lefakis. (2008).
**Metallurgical Evaluation of Creep-Failed Superheater
Tubes.**

Sebastian Teir, A. J. (2002). *Heat Exchangers in Boilers.*
Helsinki: Helsinki University of Technology.

William D. Callister, J. (2007). *Materials Science and
Engineering.* New York: John Wiley and Sons, Inc.

BIOGRAFI PENULIS



Penulis bernama lengkap Jeremy Adrian, dilahirkan di kota Jakarta pada tanggal 2 November 1994. Penulis merupakan anak pertama dari 2 bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal di SD Maria Fransiska Bekasi, lalu melanjutkan ke tingkat selanjutnya di SMP Pax Ecclesia Bekasi, dan SMA Fons Vitae 1 Jakarta. Setelah lulus dari bangku SMA, Penulis melanjutkan studinya di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya tepatnya pada Jurusan Teknik Material dan Metalurgi.

Selama menjadi mahasiswa, penulis aktif menjadi anggota Himpunan Mahasiswa Teknik Material dan Metalurgi (HMMT) FTI-ITS Surabaya sebagai staff departemen Dalam Negeri HMMT FTI-ITS periode kepengurusan 2013-2014. Pada Tahun yang sama penulis juga aktif menjadi anggota dari Keluarga Mahasiswa Katolik (KMK) ITS sebagai staff departemen Minat Bakat KMK ITS periode Kepengurusan 2013-2014. Pada kepengurusan selanjutnya, penulis terpilih menjadi Ketua Keluarga Mahasiswa Katolik yang merupakan naungan Tim Pembina Kerohanian Katolik pada periode kepengurusan 2014-2015. Setelah berakhir tahun 2015, penulis tidak melanjutkan untuk berorganisasi sampai sekarang.

Penulis memiliki ketertarikan di bidang korosi dan analisa kegagalan yang merupakan salah satu bidang penting di Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS. Penulis telah mengikuti beberapa pelatihan dan seminar korosi dan sekarang penulis sudah memegang sertifikasi sebagai *Corrosion Engineer* level 1.

Akhir kata, bila ada kritik dan saran yang ingin disampaikan kepada penulis bisa dikirimkan ke email penulis: jerry.adri5@gmail.com.